

# A method for evaluating delay tests quality

## BACKGROUND OF THE INVENTION

### 1. Field of the Invention

本発明は、半導体集積回路の遅延故障検査を行う際に使用する検査系列の故障検査能力を表す品質の評価に関するものである。

### 2. Description of the related art

近年の半導体プロセスの微細化技術の急速な進歩によって、半導体集積回路の大規模化、複雑化が急激に進み、これに伴って半導体集積回路の検査がいつそう困難になっている。この問題に対処するため、半導体集積回路の検査を容易化する手段としてスキャン方式などによる検査容易化設計手法が普及し、縮退故障モデルで表される故障は効率的に検査できるようになった。縮退故障モデルで仮定された故障を検出する場合、故障検出の能力はクロック周波数に依存しないため、従来スキャンテストを実施する際には、一般的に実動作速度よりも低いクロック周波数を使って行われてきた。しかし、半導体プロセスの微細化の進行と共に、プロセスのばらつきが顕在化し、従来のスキャン方式を使った低いクロック周波数による検査だけでは十分に検査品質を保証することができなくなり、実動作時と同じクロック周波数を使った遅延故障検査技術のような、遅延を考慮した検査が必要とされるようになった。従来の遅延故障検査技術は「特開平 9 - 2 6 9 9 5 9」などに開示されている。

遅延故障用の検査系列の品質を表す故障検出率は一般には次のような式で表わすのがよいと考えられている。

$$\begin{aligned} \text{故障検出率} = & \text{検出故障数} / (\text{全定義故障数} - \text{テスト不能故障数}) \\ & \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (\text{式 1})$$

しかしながら、(式 1)におけるテスト不能故障数を正確に算出することは膨大な計算時間と計算機メモリを要するため非現実的であった。このため、従来は故

障検出率を次のような式で代用するのが一般的であった。

$$\text{故障検出率} = \text{検出故障数} / \text{全定義故障数} \times 100 (\%) \quad (\text{式} 2)$$

しかしながら、特にパス遅延故障の場合、縮退故障と異なりテスト不能故障の割合が非常に大きいことが知られており、(式2)のようにテスト不能故障を考慮しない故障検出率算出方法では、テスト可能な故障をすべて検出しているにも係わらず故障検出率が非常に低い値となってしまう場合があり、算出された数値が実際のテスト品質を正しく評価できないという問題があった。

さらには、仮に(式1)を用いることができた場合でも、どの遅延故障も重要度が等しいと見なされるため、(式1)の故障検出率は検査系列の実際の故障検査に対する品質を十分に反映できていない、という問題をはらんでいた。この問題を図を用いて具体的に説明する。

図11は、半導体集積回路上に定義した遅延故障の特性を示すための図である。信号経路1～6の右側に示した矢印の長さは、それぞれ各信号経路の設計上の遅延値を示す。また図の右側の点線は半導体集積回路の1クロックレートの値を表す。なお、説明の便宜上、信号経路1～6はすべてテスト可能として説明を行う。

一般に、信号経路の設計上の遅延値が大きいほど(1クロックレートに近いほど)、この信号経路が遅延故障を生じる可能性が大きい。したがって、図11において、信号経路3が信号経路6よりも遅延故障を生じる可能性が大きいことは明らかである。そのため信号経路3に定義した遅延故障を検出する検査は、信号経路6に定義した遅延故障を検出する検査よりも検査の品質がより高いと言える。しかしながら、従来用いていた故障検出率では、信号経路3上の遅延故障を検出した場合も、信号経路6上の遅延故障を検出した場合も、同じく1個の遅延故障を検出したと扱われ、その品質は同等とみなされる。例えば、信号経路1～6上にそれぞれ1個ずつ遅延故障を定義したと仮定すると、信号経路1～3上の故障を検出した場合も、信号経路4～6上の故障を検出した場合も、故障検出率はいずれも等しく、 $3/6 \times 100 [\%] = 50\%$ となる。

遅延値の大きな信号経路1～3上を故障検出する検査と、遅延値の小さな信号

経路 4 ～ 6 を故障検査する検査とでは、前者の方が品質が高いのは明らかであるので、したがって従来の検査で使用していた故障検出率（式 1）は、検査の品質を正しく表しておらず、そのため検査に使用する検査系列の品質を誤って評価してしまっていた、という問題があった。

## SUMMARY OF THE INVENTION

本発明はこのような問題を解決するために、遅延故障用の検査系列の品質を評価する際に、テスト不能な遅延故障数を推定することによって、（式 1）を現実的に実施可能とすることを第 1 の目的とし、さらには遅延故障を定義した信号経路上の設計上の遅延値を考慮することによって、遅延故障検査系列の品質をより高精度に評価することのできる遅延故障検査品質評価方法を提供することを第 2 の目的とする。

以上の目的を達成するため、本発明に係る遅延故障検査系列の品質評価方法は、半導体集積回路に対して遅延故障を定義する遅延故障定義手段と、定義された遅延故障のうちの一部の遅延故障を選択する遅延故障選択手段と、選択されたおのおの遅延故障に対してテスト可能か否かを判定する第 1 のテスト可否判定手段と、選択された故障のうちテスト不能と判定された遅延故障の数を用いて遅延故障検出率を算出する遅延故障検出率算出手段を備える。

また、本発明は、前記遅延故障検査品質評価方法において、前記遅延故障定義手段が、前記半導体集積回路中のすべての信号経路についてパス遅延故障を定義する。

また、本発明は、前記遅延故障検査品質評価方法において、前記遅延故障定義手段が、前記半導体集積回路中のすべてのノードに対して遅延故障を定義する。

ここでノードとは、信号線またはゲートの各端子などをさすものとする。

また、本発明では、前記半導体集積回路中の処理対象となる遅延故障に対して、あらかじめテスト可能か否かを判定する第 2 のテスト可否判定手段を備える。

また、前記遅延故障定義手段ではさらに、各遅延故障について、あらかじめテスト可能か否かを判定する第 2 のテスト可否判定手段を備え、ここでテスト可能と判定された遅延故障のみを前記半導体集積回路に定義する。または、前記遅延

故障定義手段では、全遅延故障数よりも小さい所定数の遅延故障を前記半導体集積回路に定義する。

また、前記遅延故障選択手段では、定義された遅延故障のうち、所定数もしくは所定割合の遅延故障をランダムに選択する。

または、前記遅延故障選択手段では、定義されたパス遅延故障のうち、各ノードについて前記ノードを通る最大遅延値の信号経路を選択する。

または、前記遅延故障選択手段では、定義されたパス遅延故障のうち、各ノードについて前記ノードを通る最大ゲート段数の信号経路を選択する。

または、前記遅延故障選択手段では、定義されたパス遅延故障のうち、各ノードについて前記ノードを通る最長の信号経路を選択する。

また、前記第1のテスト可否判定手段では、選択された遅延故障に対して検査系列生成を行い、検査系列生成不能である遅延故障をテスト不能と判定する。

また、前記遅延故障検出率算出手段ではさらに、定義された遅延故障に対して、与えられた検査系列を用いて遅延故障シミュレーションを実行する遅延故障シミュレーション手段と、定義された遅延故障数と、前記第1のテスト可否判定手段で判定されたテスト不能な遅延故障数と、前記遅延故障シミュレーションによって検出された遅延故障数とを用いて故障検出率計算を行う故障検出率計算手段とを備える。

または、前記故障検出率計算手段では、前記第1のテスト可否判定手段で判定されたテスト不能な遅延故障数に対して、選択された遅延故障数と定義された遅延故障数との比を積算した値を全テスト不能故障数とし、遅延故障検出率の分子を前記遅延故障シミュレーション手段で検出された遅延故障数とし、遅延故障検出率の分母を選択された遅延故障数から全テスト不能故障数の減算で計算を行う。

また、前記遅延故障定義手段ではさらに、パス遅延故障が定義された信号経路の設計上の遅延量の合計値を算出する第1の合計値算出手段を備え、前記第1のテスト可否判定手段ではさらに、テスト不能と判定されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値を算出する第2の合計値算出手段を備え、前記遅延故障検出率算出手段にはさらに、検出されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値を算出する第3の合計値算出手段と、前記第1の合計値算出手段

で算出された定義されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値と、前記第2の合計値算出手段で算出されたテスト不能なパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値と、前記第3の合計値算出手段で算出された検出されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値とを用いて故障検出率計算を行う故障検出率計算手段とを備える。

また、前記故障検出率計算手段では、前記第2の合計値算出手段で算出されたテスト不能なパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値に対して、前記遅延故障選択手段で選択された遅延故障数と前記遅延故障定義手段で定義された遅延故障数との比を積算した値を全テスト不能故障量とし、遅延故障検出率の分子を前記第3の合計値算出手段で算出された検出されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値とし、遅延故障検出率の分母を前記第1の合計値算出手段で算出された定義されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値から前記全テスト不能故障量の減算で計算を行う。

また、前記信号経路の設計上の遅延量は設計上の信号経路の設計上の遅延値、もしくは信号経路上のゲート段数、もしくは物理的な信号経路長を用いる。

## BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

【図1】本発明の実施形態に係わる遅延故障検査品質評価方法を示すフローチャート

【図2】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図3】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図4】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図5】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図6】本発明の実施形態に係わる遅延故障検査品質評価方法を示すフローチャート

【図7】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図8】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図9】図1のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図10】本発明の実施形態を補足する図

【図 1 1】従来技術の課題を説明する図

【図 1 2】図 2 のフローチャートの一部をより詳細に説明するフローチャート

【図 1 3】図 1 2 の実施形態を補足する図

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

一般に 1 つのノード上または信号経路上の遅延故障には、立上がり遷移の故障と立下り遷移の故障の 2 種類があり、遅延故障はノードまたは信号経路と遷移の種類との組合せで表される。しかし本明細書中では以後、説明の便宜上、遷移の種類は省略して 1 つのノードまたは信号経路上には 1 つの遅延故障が定義されるものとして説明を行う。

##### (第 1 の実施の形態)

本実施の形態は、定義された遅延故障のうちのテスト不能な遅延故障数を推定することによって、遅延故障検査系列の品質評価の精度を向上させる具体的な実施方法について説明したものである。

図 1 は本発明に係わる遅延故障検査品質評価方法を示すフローチャートである。1 は検査対象である論理回路データ、2 は論理回路中に定義する遅延故障定義情報、3 は遅延故障検査に用いる検査系列、4 は故障検出率、5 は論理回路に対して遅延故障を定義する故障定義操作、6 は定義された故障のうちの一部を選択する部分故障選択操作、7 は選択された故障がテスト可能か否かを判定するテスト可否判定操作、8 は故障検出率を算出する故障検出率算出操作を示す。なお、遅延故障定義情報 2 には、定義する故障のリスト、または全故障を定義する旨の指示、または論理回路中の一部のブロックに対してのみ故障を定義する旨の指示、のように論理回路中へ故障を定義するために必要な情報が格納されているものとする。

図 2 は操作 5 の故障定義操作のより詳細を示すフローチャートである。21 は論理回路に対して故障を定義する操作、22 は定義された故障に対して、前処理として容易にテスト不能と判別できる故障を判別するテスト不能故障判定操作、23 は操作 22 でテスト不能と判定された故障を故障定義から除外する操作、24 は操作 23 の結果、除外されずに定義されている故障数を集計する操作を示す。

図 3 は操作 6 の部分故障選択操作のより詳細を示すフローチャートである。3 1 は回路中のノードを 1 つ選択する操作、3 2 は選択したノードを通る最大遅延値のパス遅延故障を選択する操作、3 3 は未処理ノードの有無の判定、3 4 は操作 3 2 で選択された信号経路を集計する操作を示す。なお、操作 3 2 では、最大遅延値の信号経路が複数あった場合には、すべて選択するものとする。

図 4 (a) は操作 7 のテスト可否判定操作のより詳細を示すフローチャートである。4 1 は遅延故障を 1 つ選択する操作、4 2 は選択した遅延故障に対して検査系列を生成する操作、4 3 は未処理の故障があるか否かの判定、4 4 は操作 4 2 においてテスト不能と判明した故障数を集計する操作を示す。なお、操作 4 2 における検査系列生成方法は、本実施例では従来から用いられている一般的な方法を用いるものとして、その詳細説明は省略する。

図 5 は操作 8 の故障検出率算出操作のより詳細を示すフローチャートである。5 1 は故障シミュレーションを実行する操作、5 2 は故障検出率を計算する故障検出率計算操作を示す。

図 1 2 は操作 2 2 のより詳細を示すフローチャートである。操作 2 2 は本実施例では一般に用いられている既知の方法（例えば「電子情報通信学会論文誌 D-I Vol. J 82-D-I No. 7 pp. 888-896」）を用いるものとして説明する。2 0 1 は部分信号経路をリストアップする操作、2 0 2 は各部分信号経路についてテスト可能か否かを解析する操作、2 0 3 はテスト不能な部分信号経路を通るパス遅延故障をすべてテスト不能故障としてリストアップする操作、2 0 4 は到達可能な部分信号経路ペアをリストアップする操作、2 0 5 は部分信号経路ペアがテスト可能か否かを解析する操作、2 0 6 は操作 2 0 4 でテスト不能と判定された部分信号経路ペアを通るパス遅延故障をテスト不能故障としてリストアップする操作を示す。

図 1 3 は本実施の形態を説明する回路図である。1 0 1 ~ 1 1 4 は信号線、1 2 0 は OR ゲート、1 2 1 ~ 1 2 2 はインバータ、1 2 3 ~ 1 2 4 は AND ゲートを示す。

以下、図 1 ~ 5、および図 1 2 ~ 1 3 を用いて本発明の第 1 の実施の形態を説明する。

本実施例では、遅延故障の一例としてパス遅延故障を用いて説明を行う。

初めに与えられた論理回路データ 1 に対して遅延故障定義情報 2 を用いて故障定義操作 5 を行う。遅延故障定義情報 2 は本実施の形態においては、全故障定義の指示が格納されているものとして説明を行う。次に故障定義操作 5 では、まず操作 2 1 において、遅延故障定義情報 2 の指示に基づいて論理回路中のすべての信号経路についてパス遅延故障を定義する。ここで定義されたパス遅延故障数とその中に含まれるテスト不能故障数はそれぞれ 1 5 0 0 0 個、2 2 0 0 個であると仮定する。

次に操作 2 2 では、定義した全パス遅延故障に対して簡易的なテスト不能パス判定を行う。まず操作 2 0 1 において部分信号経路のリストアップを行う。ここで部分信号経路とは、外部入力（外部双方向を含む）または分岐の枝を始点とし、外部出力（外部双方向を含む）または分岐の幹を終点とする信号経路とする。図 1 3 において、例えば信号線 1 0 2、1 0 3、1 0 5、1 0 6 が分岐の枝であり、また信号線 1 0 1、1 0 4、1 1 1、1 1 4 が分岐の幹であるので、操作 2 0 1 では、経路（信号線 1 0 3→信号線 1 1 3）、経路（信号線 1 0 2→信号線 1 0 8→信号線 1 1 1）、経路（信号線 1 0 6→信号線 1 0 8→信号線 1 1 1）、経路（信号線 1 0 5→信号線 1 0 9→信号線 1 1 0→信号線 1 1 1）、経路（信号線 1 1 2→信号線 1 1 4）の 5 つが部分信号経路としてリストアップされる。続いて操作 2 0 2 では 5 つの部分信号経路についてテスト可能か否かの解析を行う。ここでは、おのこの部分信号経路について遷移が伝搬する操作を試み、成功すればテスト可能、矛盾が生じればテスト不能と判定する。例えば、経路（信号線 1 0 6→信号線 1 0 8→信号線 1 1 1）においては、信号線 1 0 1、1 0 7 の値をそれぞれ 0、1 に固定することが可能であれば、経路の活性化が可能であるためテスト可能と判定される。今操作 2 0 2 では、経路（信号線 1 0 5→信号線 1 0 9→信号線 1 1 0→信号線 1 1 1）のみが、信号線 1 0 7 が必ず 1 に固定されてしまうためテスト不能と判定されたとし、他の部分信号経路はすべてテスト可能と判定されたとする。次に操作 2 0 3 では、テスト不能な部分信号経路である経路（信号線 1 0 5→信号線 1 0 9→信号線 1 1 0→信号線 1 1 1）上を通るパス遅延故障をすべてテスト不能故障としてリストアップする。ここでは 2 0 0 0 個の故障



がリストアップされたものとする。引き続いて操作 204 では、テスト不能な部分信号経路を除外して、到達可能な部分信号経路のペアをすべてリストアップする。例えば経路（信号線 102 → 信号線 108 → 信号線 111）から経路（信号線 112 → 信号線 114）へは到達可能であり、この 2 つの部分信号経路のペアを {経路（信号線 102 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）} と表記することとすると、2 つの部分信号経路のペア {経路（信号線 102 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）}, {経路（信号線 106 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）} がリストアップされる。さらに操作 205 では、おのこの部分信号経路のペアがテスト可能か否かを判定する。例えば {経路（信号線 106 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）} においては、経路（信号線 106 → 信号線 108 → 信号線 111）の遷移伝搬のためには信号線 102 の値が 0 であることが必要であるが、一方、経路（信号線 106 → 信号線 108 → 信号線 111）の遷移伝搬のためには信号線 103 の値が 1 であることが必要であり、両者が矛盾する。したがって {経路（信号線 106 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）} はテスト不能と判定される。一方 {経路（信号線 102 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）} は矛盾が生じず、テスト可能と判定されたものとする。最後に操作 206 では、{経路（信号線 106 → 信号線 108 → 信号線 111）, 経路（信号線 112 → 信号線 114）} を通るパス遅延故障がすべてテスト不能故障としてリストアップされる。ここでは 3000 個の故障がリストアップされたものとする。

したがって操作 22 では合計 5000 個のパス遅延故障がテスト不能と判定される。引き続き操作 23 ではテスト不能と判定された 5000 個のパス遅延故障を定義から除外する。さらに操作 24 では、定義されている故障数が（15000 個 - 5000 個）により 10000 個と集計される。

次に部分故障選択操作 6 では、まず操作 31 でノードを 1 つ選択する。なお、与えられた論理回路データ 1 中には 3000 のノードが存在するものとする。次に操作 32 では選択したノードを通る定義されたパス遅延故障のうち、信号経路

上の遅延値が最も大きいパス遅延故障を選択する。もし選択したノードを通る定義されたパス遅延故障が存在しない場合は、そのノードは処理済みとして、操作 3 3 へ進む。今、選択されたパス遅延故障上に 1 0 個のノードが含まれたとする。引き続いて操作 3 3 では、未処理のノードがあるか否かの判定を行い、2 9 9 0 個のノードが未処理なので、再度操作 3 1 へ進み、未処理のノードを 1 つ選択し、操作 3 2 へ進んで選択したノードを通る信号経路上の遅延値が最も大きいパス遅延故障を選択する。今、選択されたパス遅延故障上に 2 0 個のノードが含まれたとする。引き続いて操作 3 3 では、未処理のノードがあるか否かの判定を行い、2 9 7 0 個のノードが未処理なので、再度操作 3 1 へ進む。同様に操作 3 1 から操作 3 3 の繰り返しを行い、判定 3 3 において未処理のノードが存在しなくなったら、最後に操作 3 4 において、これまで操作 3 2 で選択されたパス遅延故障を集計して故障リストを作成する。今、1 0 0 0 個のパス遅延故障による故障リストが作成されたものとする。

次にテスト可否判定操作 7 では、まず操作 4 1 において、操作 3 4 で作成された故障リスト中のパス遅延故障を 1 つ選択する。次に操作 4 2 では、選択した故障に対する検査系列生成操作を行い、テスト可能かテスト不能かの判定を行う。引き続き操作 4 3 では、未処理の故障があるかどうかを判定する。ここではまだ 9 9 9 個の故障が残っているので、再度操作 4 1 へ進み、新たにパス遅延故障を 1 つ選択する。次に操作 4 2 では、選択した故障に対する検査系列生成操作を行い、テスト可能かテスト不能かの判定を行う。引き続き操作 4 3 では、未処理の故障があるかどうかの判定が、まだ 9 9 8 個の故障が残っているので、再度操作 4 1 へ進む。同様に操作 4 1 から操作 4 3 を繰り返し、操作 4 3 において未処理の故障がなくなったら、最後に操作 4 4 において、操作 4 2 でテスト不能と判定された故障の数を集計する。今、操作 4 2 でテスト不能と判定された故障数が 2 0 0 個であったとする。

次に故障検出率算出操作 8 では、まず操作 5 1 において、与えられた検査系列 3 を用いて故障シミュレーションを実施する。このとき対象となる故障は操作 2 4 で集計されたすべての故障である。この操作で検出された故障数が 6 0 0 0 個であったとする。次に操作 5 2 では、操作 5 1 で検出された故障数を検出故障数

とし、操作 2 4 で集計された定義故障数を全定義故障数とし、操作 3 4 で作成された故障リスト中の故障数を部分選択故障数とし、操作 4 4 で集計されたテスト不能故障数を部分テスト不能故障数として、次の式によって全定義故障中のテスト不能故障推定数を算出する。

$$\begin{aligned} \text{テスト不能故障推定数} &= \text{部分テスト不能故障数} \\ &\quad \times \text{全定義故障数} / \text{部分選択故障数} \end{aligned} \quad (\text{式 3})$$

次に算出されたテスト不能故障推定数を用いて、次の式によって故障検出率を算出する。

$$\begin{aligned} \text{故障検出率} &= \text{検出故障数} / (\text{全定義故障数} - \text{テスト不能故障推定数}) \\ &\quad \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (\text{式 4})$$

今、部分テスト不能故障数、全定義故障数、部分選択故障数、検出故障数は、それぞれ 200 個、10000 個、1000 個、6000 個であるので、(式 3) よりテスト不能故障推定数は 2000 個と算出され、次に (式 4) によって、故障検出率は 75% と算出される。

一方、実際のテスト不能故障数は 2200 個なので、(非現実的な時間を要するが) 実際の故障検出率を算出すると (式 1) より 76.9% となる。

これに対して従来代用されていた (式 2) による故障検出率ではテスト不能故障の数を全く考慮しないために 60% という非常に低い値となってしまう、与えられた検査系列による検査品質を過小に見積もってしまう結果となる。

実際の実験結果の一例として、ISCAS89 ベンチマーク回路の 1 つである s38417 への実行結果から、従来代用されていた故障検出率 (式 2) が 80% となる検査系列を用いて、テスト可能な実際の故障検出率 (式 1)、本実施例の手法による故障検出率 (式 4) を求めると、それぞれ 85.6%、85.7% であり、本実施例の手法が非常に精度が高いことがわかる。

以上から、本発明による遅延故障検査品質評価方法では、テスト不能故障と推

定される故障の数を考慮することによって、実際の故障検出率に近い故障検出率の値を算出することができる。

なお、操作 5 で定義された故障数（10000 個）に対する操作 6 で選択された故障数は（1000 個）であるので、その割合は 0.1 である。このとき操作 8 で算出された故障検出率の誤差が例えば統計的に 0.5% と求められたとした場合、故障検出率として  $(75\% - 0.5\%) = 74.5\%$  という値を用いることにより、サンプリング誤差を考慮した故障検出率の過大見積りを防止することができ、さらに効果的である。また、より簡易的な方法として、操作 5 で定義された故障数に対する操作 6 で選択された故障数の割合に関係なく所定の誤差の値（例えば 1%）を用いれば、演算量を抑えることが可能になる。

なお、部分故障選択操作 6 の実行方法として本実施の形態で説明に使用した図 3 の方法の代わりに、操作 24 で定義されている故障からランダムで所定数の故障を選択しても同様の効果が得られることは明らかである。

また操作 32 において、本実施の形態ではノードを通る最大遅延値のパス遅延故障を選択する、として説明を行ったが、最大遅延値の代わりに最大ゲート段数か、または物理的な最大信号経路長を用いても同様の効果を得ることができる。なお、上記物理的な信号経路長はレイアウトデータから算出できる信号系路上の配線長の総和を用いてもよい。

さらには、遅延故障定義情報 2 の内容は、本実施の形態では、全故障を定義するための指示、として説明を行ったが、全故障の一部で構成される故障リスト、または論理回路データ 1 の 1 ブロックに対して故障を定義するための指示などのように、全故障ではなく一部の故障を定義するものであっても同様の効果を得ることができる。

なお前記第 1 の実施の形態では、半導体集積回路中の遅延故障に対し、あらかじめテスト可能か否かを判定する第 2 のテスト可否判定手段を備え、第 2 のテスト可否判定手段によってテスト可能と判断された遅延故障のみを半導体集積回路に定義するようにしたが、図 2 の操作 22 から 24 に代えて、図 4 (b) に変形例を示すように、操作 41（第 1 のテスト可否判定手段の処理に相当）の前段に、テスト不能故障であるか否かを判定する操作 40 を追加してもよい。この場合、

テスト不能故障数を集計する操作 4 0 は、前記操作 4 0 でテスト可能と判断された遅延故障をテスト不能故障数集計に加える操作 4 4 S に置き換える。

これにより、テスト不能故障判定（操作 4 0）の処理対象が選択された故障のみとなるため、テスト不能故障判定の演算量を低減することができ、さらなる処理の高速化をはかることができる。

## （第 2 の実施の形態）

本実施の形態は、定義された遅延故障のうちのテスト不能な遅延故障数を推定することによって、遅延故障検査系列の品質評価の精度を向上させる第 1 の実施の形態とは別の実施方法について説明したものである。

本実施の形態では、遅延故障の別の例としてノード上の遅延故障を用いて説明を行う。ノード上の遅延故障を本実施の形態においては、遷移故障と呼ぶこととする。

図 6 は本発明に係わる遅延故障検査品質評価方法を示すフローチャートである。6 1 は論理回路中の各ノードに対して故障定義を行う故障定義操作、6 2 は定義された故障のうち所定数または所定割合の故障をランダムで選択する操作を示し、その他の記号は図 1 の一致する記号と同じものを表す。

以下、図 6、図 4、および図 5 を用いて本発明の第 2 の実施の形態を説明する。

初めに与えられた論理回路データ 1 に対して遅延故障定義情報 2 を用いて故障定義操作 6 1 を行う。遅延故障定義情報 2 は本実施の形態においては、全故障定義の指示が格納されているものとして説明を行う。次に故障定義操作 6 1 では、与えられた論理回路データ 1 の全ノードへ遷移故障を定義する。なお、与えられた論理回路データ 1 中には 3 0 0 0 のノードが存在するものとする、全定義故障数は 3 0 0 0 個となる。このとき、3 0 0 0 個の故障に含まれるテスト不能故障数は 5 2 0 個であると仮定する。

次に部分故障選択操作 6 2 では、全定義故障のうちの所定数または所定割合の故障をランダムで選択する。ここでは所定割合 1 0 % の故障を選択するものとする、操作 6 2 でランダムに選択される故障数は 3 0 0 となる。

次にテスト可否判定操作 7 では、まず操作 4 1 において、操作 6 2 で選択され

た 300 個の遷移故障のうちから、故障を 1 つ選択する。次に操作 4 2 では、選択した故障に対する検査系列生成操作を行い、テスト可能かテスト不能かの判定を行う。引き続き操作 4 3 では、未処理の故障があるかどうかを判定する。ここではまだ 299 個の故障が残っているので、再度操作 4 1 へ進み、新たに遷移故障を 1 つ選択する。次に操作 4 2 では、選択した故障に対する検査系列生成操作を行い、テスト可能かテスト不能かの判定を行う。引き続き操作 4 3 では、未処理の故障があるかどうかの判定が、まだ 298 個の故障が残っているので、再度操作 4 1 へ進む。同様に操作 4 1 から操作 4 3 を繰り返し、操作 4 3 において未処理の故障がなくなったら、最後に操作 4 4 において、操作 4 2 でテスト不能と判定された故障の数を集計する。今、操作 4 2 でテスト不能と判定された故障数が 50 個であったとする。

次に故障検出率算出操作 8 では、まず操作 5 1 において、与えられた検査系列 3 を用いて故障シミュレーションを実施する。このとき対象となる故障は操作 6 1 で定義されたすべての故障である。この操作で検出された故障数が 2000 個であったとする。次に操作 5 2 では、操作 5 1 で検出された故障数を検出故障数とし、操作 6 1 で定義された定義故障数を全定義故障数とし、操作 6 2 で選択された故障数を部分選択故障数とし、操作 4 4 で集計されたテスト不能故障数を部分テスト不能故障数として、(式 3)によって全定義故障中のテスト不能故障推定数を算出する。次に算出されたテスト不能故障推定数を用いて、(式 4)によって故障検出率を算出する。

今、部分テスト不能故障数、全定義故障数、部分選択故障数、検出故障数は、それぞれ 50 個、3000 個、300 個、2000 個であるので、(式 3)よりテスト不能故障推定数は 500 個と算出され、次に (式 4) によって、故障検出率は 80% と算出される。

一方、実際のテスト不能故障数は 520 個なので、実際の故障検出率を算出すると (式 1) より 80.6% となる。

これに対して従来代用されていた (式 2) による故障検出率ではテスト不能故障の数を全く考慮しないために 66.7% という非常に低い値となってしまう、与えられた検査系列による検査品質を過小に見積もってしまう結果となる。

なお、操作 5 で定義された故障数（3000 個）に対する操作 6 で選択された故障数は（300 個）であるので、その割合は 0.1 である。このとき操作 8 で算出された故障検出率の誤差が例えば統計的に 0.5 %と求められたとした場合、故障検出率として  $(80\% - 0.5\%) = 79.5\%$  という値を用いることにより、サンプリング誤差を考慮した故障検出率の過大見積りを防止することができ、さらに効果的である。また、より簡易的な方法として、操作 5 で定義された故障数に対する操作 6 で選択された故障数の割合に関係なく所定の誤差の値（例えば 1 %）を用いれば、演算量を抑えることが可能になる。

なお、遅延故障定義情報 2 の内容は、本実施の形態では、全故障を定義するための指示、として説明を行ったが、全故障の一部で構成される故障リスト、または論理回路データ 1 の 1 ブロックに対して故障を定義するための指示などのように、全故障ではなく一部の故障を定義するものであっても同様の効果を得ることができる。

### （第 3 の実施の形態）

本実施の形態は、遅延故障を定義した信号経路上の設計上の遅延値を用いて、遅延故障検査系列の品質評価を行うことによって、遅延故障検査系列の品質評価の精度を向上させる具体的な実施方法について説明したものである。

本実施例では、遅延故障の一例としてパス遅延故障を用いて説明を行う。

図 7 は操作 5 の故障定義操作のより詳細を示すフローチャートである。71 は操作 24 で論理回路上に定義されているすべてのパス遅延故障について、信号系路上の設計上の遅延値の総和を算出する操作を示し、それ以外の記号は図 2 の一致する操作と同じものを示す。

図 8 は操作 7 のテスト可否判定操作のより詳細を示すフローチャートである。81 は操作 44 で集計されたすべてのテスト不能故障について、信号系路上の設計上の遅延値の総和を算出する操作を示し、それ以外の記号は図 4 の一致する操作と同じものを示す。

図 9 は操作 8 の故障検出率算出操作のより詳細を示すフローチャートである。91 は操作 51 の故障シミュレーションによって検出されたすべてのパス遅延故障について、信号系路上の設計上の遅延値の総和を算出する操作を示し、それ以

外の記号は図5の一致する操作と同じものを示す。

図10は、本発明に係わる遅延故障検査品質評価方法の動作を説明するための図である。パス遅延故障1～20は、論理回路データ1中に定義されるパス遅延故障を示し、各パス遅延故障の右側の矢印は各パス遅延故障が定義される信号経路の設計上の遅延値の大きさを示し、矢印の上の値はその具体的な遅延値を示す。

以下、図1、図3、図7～10を用いて本発明の第3の実施の形態を説明する。

初めに与えられた論理回路データ1に対して遅延故障定義情報2を用いて故障定義操作5を行う。遅延故障定義情報2には図10で示されている20個のパス遅延故障のリストが格納されている。次に故障定義操作5では、まず操作21において、遅延故障定義情報2で与えられたパス遅延故障を論理回路中の信号経路に定義する。ここで定義されたパス遅延故障数とその中に含まれるテスト不能故障数はそれぞれパス遅延故障2、10、15、20の4個であると仮定する。次に操作22では、定義した全パス遅延故障に対して簡易的なテスト不能パス判定を行い、その結果テスト不能と判定されたものが全くなかったとする。したがって次の操作23ではテスト不能と判定されたパス遅延故障が存在しないので何も行わない。次に操作24では、定義されている故障数が20個と集計される。最後に操作71では、定義されている20個のパス遅延故障について、信号経路の設計上の遅延値の総和を算出する。ここでは図10に示す各パス遅延故障の遅延値から、総和の値は141nsと算出される。

次に部分故障選択操作6では、まず操作31でノードを1つ選択する。なお、与えられた論理回路データ1中には3000のノードが存在するものとする。次に操作32では選択したノードを通る定義されたパス遅延故障のうち、信号経路上の遅延値が最も大きいパス遅延故障を選択する。もし選択したノードを通る定義されたパス遅延故障が存在しない場合は、そのノードは処理済みとして、操作33へ進む。今、選択されたパス遅延故障上に20個のノードが含まれたとする。引き続き操作33では、未処理のノードがあるか否かの判定を行い、2980個のノードが未処理なので、再度操作31へ進み、未処理のノードを1つ選択し、操作32へ進む。今、選択したノードを通る定義されたパス遅延故障が存在しなかったとする。このとき、選択したノードを処理済みとして操作33へ進む。操作



3 3では、未処理のノードがあるか否かの判定を行い、2 9 7 9個のノードが未処理なので、再度操作3 1へ進む。同様に操作3 1から操作3 3の繰り返しを行い、判定3 3において未処理のノードが存在しなくなったら、最後に操作3 4において、これまで操作3 2で選択されたパス遅延故障を集計して故障リストを作成する。今、パス遅延故障2、3、6、1 2、1 7（図1 0において太線で示したパス遅延故障）の5個のパス遅延故障による故障リストが作成されたものとする。

次にテスト可否判定操作7では、まず操作4 1において、操作3 4で作成された故障リスト中のパス遅延故障2を選択する。次に操作4 2では、選択した故障に対する検査系列生成操作を行い、テスト不能と判定されたとする。引き続き操作4 3では、未処理の故障があるかどうかを判定する。ここではまだ4個の故障が残っているので、再度操作4 1へ進み、新たにパス遅延故障3を選択する。次に操作4 2では、選択した故障に対する検査系列生成操作を行い、テスト可能と判定されたとする。引き続き操作4 3では、未処理の故障があるかどうかを判定が、まだ3個の故障が残っているので、再度操作4 1へ進む。同様に操作4 1から操作4 3を繰り返し、操作4 3において未処理の故障がなくなったら、操作4 4へ進み、操作4 2でテスト不能と判定された故障の数を集計する。今、操作4 2でテスト不能と判定された故障数がパス遅延故障2のみの1個であったとする。最後に、操作8 1において、テスト不能と判定されたパス遅延故障の遅延値の総和を算出する。今、テスト不能と判定された故障はパス遅延故障2のみであるので、この遅延値8 n sが総和として算出される。

次に故障検出率算出操作8では、まず操作5 1において、与えられた検査系列3を用いて故障シミュレーションを実施する。このとき対象となる故障は操作2 4で集計されたすべての故障である。この操作で検出された故障がパス遅延故障3、7、9、1 1、1 4、1 7、1 9の7個であったとする。次に操作9 1では、検出されたパス遅延故障の遅延値の総和を算出する。図1 0より総和の値は5 8 n sと算出される。次に操作5 2では、操作9 1で算出された検出故障の遅延値の総和を検出故障量とし、操作2 4で集計された定義故障数を全定義故障数とし、操作7 1で集計された定義故障の遅延値の総和を全定義故障量とし、操作3 4で

作成された故障リスト中の故障数を部分選択故障数とし、操作 8 1 で集計されたテスト不能故障の遅延値の総和を部分テスト不能故障量として、次の式によって全定義故障中のテスト不能故障推定量を算出する。

$$\text{テスト不能故障推定量} = \text{部分テスト不能故障量} \\ \times \text{全定義故障数} / \text{部分選択故障数} \quad (\text{式 4})$$

次に算出されたテスト不能故障推定量を用いて、次の式によって故障検出率を算出する。

$$\text{故障検出率} = \text{検出故障量} / (\text{全定義故障量} - \text{テスト不能故障推定量}) \\ \times 100 (\%) \quad (\text{式 5})$$

今、部分テスト不能故障量、全定義故障数、全定義故障量、部分選択故障数、検出故障量は、それぞれ 8 ns、20 個、141 ns、5 個、58 ns であるので、(式 3) よりテスト不能故障推定量は 32 ns と算出され、次に (式 4) によって、故障検出率は 53.2% と算出される。

一方、実際のテスト不能故障 (パス遅延故障 3、10、15、20) の遅延値の総和をテスト不能故障量とすると、その値は 32 ns なので、実際の故障検出率を以下の式で算出すると 53.2% となる。

$$\text{故障検出率} = \text{検出故障量} / (\text{全定義故障量} - \text{テスト不能故障量}) \\ \times 100 (\%) \quad (\text{式 6})$$

これに対して従来代用されていた (式 2) による故障検出率ではテスト不能故障の数を全く考慮しないために 37.7% となってしまう、与えられた検査系列による検査品質を誤って見積もってしまう結果となる。

以上から、本発明による遅延故障検査品質評価方法では、テスト不能故障と推定される故障の数を考慮することによって、実際の故障検出率に近い故障検出率

の値を算出することができる。

なお、操作 5 で定義された故障数（20 個）に対する操作 6 で選択された故障数は（5 個）であるので、その割合は 0.25 である。このとき操作 8 で算出された故障検出率の誤差が例えば統計的に 0.2%と求められたとした場合、故障検出率として  $(53.2\% - 0.2\%) = 53.0\%$  という値を用いることにより、サンプリング誤差を考慮した故障検出率の過大見積りを防止することができ、さらに効果的である。また、より簡易的な方法として、操作 5 で定義された故障数に対する操作 6 で選択された故障数の割合に関係なく所定の誤差の値（例えば 1%）を用いれば、演算量を抑えることが可能になる。

なお、部分故障選択操作 6 の実行方法として本実施の形態で説明に使用した図 3 の方法の代わりに、操作 24 で定義されている故障からランダムで所定数の故障を選択しても同様の効果が得られることは明らかである。

また操作 71、81、91 では、パス遅延故障が定義された信号経路の設計上の遅延値を用いて説明を行っているが、信号経路の設計上の遅延値の代わりに、信号経路上のゲート段数か、または設計上の物理的な信号経路長を用いても同様の効果を得ることができる。なお、上記物理的な信号経路長はレイアウトデータから算出できる信号系路上の配線長の総和であってもよい。

また同様に、操作 32 において、本実施の形態ではノードを通る最大遅延値のパス遅延故障を選択する、として説明を行ったが、最大遅延値の代わりに最大ゲート段数か、または物理的な最大信号経路長を用いても同様の効果を得ることができる。なお、上記物理的な信号経路長はレイアウトデータから算出できる信号系路上の配線長の総和を用いてもよい。

以上説明したように、本発明の遅延故障検査品質評価方法は、一部の故障に対してテスト不能故障を解析した結果を用いて、全定義故障中のテスト不能故障数を推定することによって、実用的な計算量で精度の高い故障検出率を算出することができる。

また各遅延故障が定義された信号経路の設計上の遅延値を考慮することによって、個々の遅延故障の重要度を遅延故障検査系列の品質評価に反映させることができるため、遅延故障検査系列の品質評価の精度を高めることができる。さらに

述べると、実際に故障を発生する可能性が大きい遅延故障ほど故障検出率への影響度合いを大きくすることができる。すなわち、そのような故障が検出された場合には故障検出率向上の度合いが大きく、逆に検出されないの故障検出率低下の度合いも大きくすることができる。

What is claimed is:

1. 半導体集積回路に対して遅延故障を定義する遅延故障定義手段と、前記遅延故障定義手段によって定義された遅延故障のうちの一部の遅延故障を選択する遅延故障選択手段と、前記遅延故障選択手段で選択されたおのおのの遅延故障に対してテスト可能か否かを判定する第1のテスト可否判定手段と、前記テスト可否判定手段でテスト不能と判定された遅延故障の数を用いて遅延故障検出率を算出する遅延故障検出率算出手段を備える遅延故障検査品質評価方法。
2. 前記遅延故障定義手段では、前記半導体集積回路中のすべての信号経路についてパス遅延故障を定義することを特徴とする請求項1の遅延故障検査品質評価方法。
3. 前記遅延故障定義手段では、前記半導体集積回路中のすべてのノードに対して遅延故障を定義することを特徴とする請求項1の遅延故障検査品質評価方法。
4. 前記半導体集積回路中の処理対象となる遅延故障に対して、あらかじめテスト可能か否かを判定する第2のテスト可否判定手段を備えることを特徴とする請求項1記載の遅延故障検査品質評価方法。
5. 前記遅延故障定義手段ではさらに、前記半導体集積回路中の遅延故障について、あらかじめテスト可能か否かを判定する第2のテスト可否判定手段を備え、前記第2のテスト可否判定手段によってテスト可能と判定された遅延故障のみを前記半導体集積回路に定義することを特徴とする請求項4記載の遅延故障検査品質評価方法。
6. 前記遅延故障定義手段では、全遅延故障数よりも小さい所定数の遅延故障を前記半導体集積回路に定義することを特徴とする請求項1記載の遅延故障検査品質評価方法。

7. 前記遅延故障選択手段では、前記遅延故障定義手段で定義された遅延故障のうち、所定数もしくは所定割合の遅延故障をランダムに選択することを特徴とする請求項1記載の遅延故障検査品質評価方法。

8. 前記遅延故障選択手段では、前記遅延故障定義手段で定義されたパス遅延故障のうち、各ノードについて前記ノードを通る最大遅延値の信号経路を選択することを特徴とする遅延故障検査品質評価方法。

9. 前記遅延故障選択手段では、前記遅延故障定義手段で定義されたパス遅延故障のうち、各ノードについて前記ノードを通る最大ゲート段数の信号経路を選択することを特徴とする請求項2記載の遅延故障検査品質評価方法。

10. 前記遅延故障選択手段では、前記遅延故障定義手段で定義されたパス遅延故障のうち、各ノードについて前記ノードを通る最長の信号経路を選択することを特徴とする請求項2記載の遅延故障検査品質評価方法。

11. 前記第1のテスト可否判定手段では、前記遅延故障選択手段で選択された遅延故障に対して検査系列生成を行い、検査系列生成不能である遅延故障をテスト不能と判定することを特徴とする請求項1記載の遅延故障検査品質評価方法。

12. 前記遅延故障検出率算出手段ではさらに、前記遅延故障定義手段で定義された遅延故障に対して、与えられた検査系列を用いて遅延故障シミュレーションを実行する遅延故障シミュレーション手段と、前記遅延故障定義手段で定義された遅延故障数と、前記第1のテスト可否判定手段で判定されたテスト不能な遅延故障数と、前記遅延故障シミュレーションによって検出された遅延故障数とを用いて故障検出率計算を行う故障検出率計算手段とを備えることを特徴とする請求項1記載の遅延故障検査品質評価方法。

13. 前記故障検出率計算手段では、前記第1のテスト可否判定手段で判定さ

れたテスト不能な遅延故障数に対して、前記遅延故障選択手段で選択された遅延故障数と前記遅延故障定義手段で定義された遅延故障数との比を積算した値を全テスト不能故障数とし、遅延故障検出率の分子を前記遅延故障シミュレーション手段で検出された遅延故障数とし、遅延故障検出率の分母を前記遅延故障選択手段で選択された遅延故障数から前記全テスト不能故障数の減算で計算を行うことを特徴とする請求項 1 2 に記載の遅延故障検査品質評価方法。

1 4. 前記遅延故障定義手段ではさらに、パス遅延故障が定義された信号経路の設計上の遅延量の合計値を算出する第 1 の合計値算出手段を備え、前記第 1 のテスト可否判定手段ではさらに、テスト不能と判定されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値を算出する第 2 の合計値算出手段を備え、前記遅延故障検出率算出手段にはさらに、検出されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値を算出する第 3 の合計値算出手段と、前記第 1 の合計値算出手段で算出された定義されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値と、前記第 2 の合計値算出手段で算出されたテスト不能なパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値と、前記第 3 の合計値算出手段で算出された検出されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値とを用いて故障検出率計算を行う故障検出率計算手段とを備えることを特徴とする請求項 2 記載の遅延故障検査品質評価方法。

1 5. 前記故障検出率計算手段では、前記第 2 の合計値算出手段で算出されたテスト不能なパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値に対して、前記遅延故障選択手段で選択された遅延故障数と前記遅延故障定義手段で定義された遅延故障数との比を積算した値を全テスト不能故障量とし、遅延故障検出率の分子を前記第 3 の合計値算出手段で算出された検出されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値とし、遅延故障検出率の分母を前記第 1 の合計値算出手段で算出された定義されたパス遅延故障の信号経路の設計上の遅延量の合計値から前記全テスト不能故障量の減算で計算を行うことを特徴とする請求項 1 4 に記載の遅延故障検査品質評価方法。

1.6. 前記信号経路の設計上の遅延量は設計上の信号経路の設計上の遅延値を用いることを特徴とする請求項 1 4 または 1 5 のいずれかに記載の遅延故障検査品質評価方法。

1 7. 前記信号経路の設計上の遅延量は信号経路上のゲート段数を用いることを特徴とする請求項 1 4 または 1 5 のいずれかに記載の遅延故障検査品質評価方法。

1 8. 前記信号経路の設計上の遅延量は物理的な信号経路長を用いることを特徴とする請求項 1 4 または 1 5 のいずれかに記載の遅延故障検査品質評価方法。

1 9. 前記遅延故障検査品質評価方法は、さらに前記遅延故障検出率から所定の誤差  $\alpha$  を差し引いた値を遅延故障検出率とすることを特徴とする請求項 1 の遅延故障検査品質評価方法。

2 0. 前記遅延故障検査品質評価方法は、さらに、前期遅延故障定義手段で定義された遅延故障数に対する前記遅延故障選択手段で選択された遅延故障数の割合が  $\beta$  であり、遅延故障検出率の誤差が  $\Gamma$  であるとした場合に、前記遅延故障検出率から前記誤差  $\Gamma$  を差し引いた値を遅延故障検出率とすることを特徴とする請求項 1 の遅延故障検査品質評価方法。



## ABSTRACT

テスト不能な遅延故障をすべて算出するのが困難であることから、遅延故障用の検査系列の故障検出率を算出する際に、テスト不能故障数を除外せずに故障検出率の算出を行っていなかったため、故障検出率がテスト品質を正しく反映していなかった。

一部の遅延故障を選択して、選択された遅延故障中のテスト不能な遅延故障数を解析することにより、全体の遅延故障に含まれるテスト不能故障数を推定する。この値を用いてテスト品質を正しく反映した故障検出率の算出を行う遅延故障検査品質評価方法を提供する。